

# ボールの回転状態推定とロボカップ戦略の高度化に関する研究

布目 裕司

指導教員：村上 和人

## 1 はじめに

ロボカップの競技の一つであるロボカップ小型リーグ（以下、SSL）は、小型車輪ロボット 6 台対 6 台でサッカーを行うロボット競技である。最近の SSL で見られるボールに回転をかけたままキックする回転付きチップキックは、ボールの回転によってバウンド後にボールの速度が大きく変化する。速度変化はボール位置の予測に大きな影響を与える。ボールが回転しているかどうかを判断できれば、より正確なボール位置の予測が可能になる。

回転推定に関する研究の多くは、ハイスピードカメラとボール表面の特徴量から画像処理を用いて推定を行っている [1]。これらの手法の問題点は、ハイスピードカメラの制御とボール表面の特徴が必要などにある。SSL で使用するオレンジ色のゴルフボールには、表面にメーカーロゴ以外の特徴が無く、また SSL のルール上、マーカーを付けることはできない。

本研究では、回転によるボール表面の見え方の変化に着目し、入力されたボール画像の濃度共起行列を求め、ここから統計的に計算した慣性特徴量を用いてボールの回転状態を推定する。またバウンド後のボール速度・位置の予測のため、回転ボールのバウンドモデルの構築を行う。回転状態推定とバウンドモデルをボールへの回りこみ戦略へ組み込み、移動時間の短縮を行ったところ、従来システムの 52% まで移動時間を短縮することができた。

以下、2 章では、ボールの回転所歌推定手法について述べる。3 章では、ボールのバウンドモデルについて説明する。4 章では、ロボカップ戦略への応用と実験結果について述べる。最後に 5 章では、研究のまとめと今後の課題を述べる。

## 2 ボールの回転状態推定手法

### 2.1 基本アイデア

ゴルフボールの回転の有無による見え方の違いを図 1 に示す。図 1(a) は静止状態の画像の一例であり、高輝度の領域が何箇所も見られる。一方、図 1(b) は回転状態の画像の一例である。回転状態では強く反射していた光がぼやけたように見える。

この反射の違いをとらえるため、濃度共起行列の慣性特徴量を計算し、ボールの回転状態を推定する。濃度共起行列は 2 点の濃度対と 2 点間の位置関係を用いた行列で表される。静止ボールでは低輝度と高輝度の対だったものが、回転ボールのぼやけた見え方によって低輝度と中輝度の対に変化し、その変化が慣性特徴量の変化として表れる（図 2）。静止/回転で慣性特徴量が大きく変化するため、閾値処理によってボールの回転状態推定が可能になる。

### 2.2 ボールの回転推定手法

#### Step1. ボール領域の抽出

入力画像（図 3）からボール部分のみを抽出した処理領域を得る。以降の処理は、図 4 に示す処理領域に対して行う。

#### Step2. 濃度共起行列を用いた特徴量の計算

Step1 の処理領域の RGB 表色系の BLUE チャンネルの輝度値から濃度共起行列  $P_{\delta}(i, j)$  を作成する。濃度共起行列



(a) 静止しているボール (b) 回転しているボール  
図 1: ボールの見え方の違い

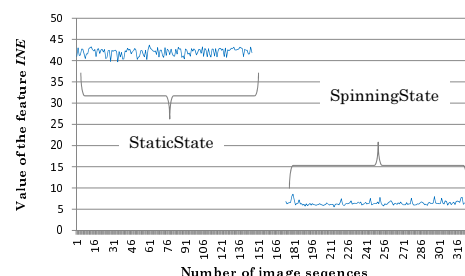


図 2: 慣性特徴量の変化

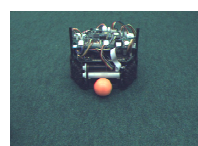


図 3: 入力画像



図 4: 抽出した処理領域

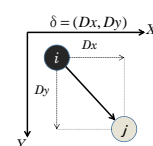


図 5: 濃度対  $i, j$  と変位  $\delta$

$P_{\delta}(i, j)$  は、図 5 のように濃度  $i$  のピクセルから一定の位置関係  $\delta = (D_x, D_y)$  だけ離れた点の濃度が  $j$  である確率を示す行列である。慣性特徴量  $INE$  は、濃度共起行  $P_{\delta}(i, j)$  から、

$$INE = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} (i-j)^2 P_{\delta}(i, j) \quad (1)$$

#### Step3. ボールの状態推定

慣性  $INE$  に対して、次式のように閾値処理を行うことで入力フレームでのボールの状態を推定する。

$$BallState = \begin{cases} StaticState & (INE > TH1) \\ UnknownState & (TH2 \leq INE \leq TH1) \\ SpinningState & (INE < TH2) \end{cases} \quad (2)$$

$UnknownState$  は  $StaticState$  と  $SpinningState$  が遷移している状態を示す。また、 $TH1$  と  $TH2$  は照明環境に合わせて調整する。

### 2.3 回転状態推定手法の有効性確認実験

ボールが回転と静止を繰り返す映像を撮影し、目視で確認したボールの状態と提案手法で推定したボールの状態を比較することで、提案手法の推定成功率を算出した。回転していたフレーム数が 2559 フレーム、静止していたフレーム数が 3541 フレーム含まれる 6100 フレームの映像で行ったところ、6054 フレームで成功したため推定成功率 99.2% となった。

### 2.4 慣性特徴量によるボールの回転速度推定

ボールの回転速度と慣性特徴量の関係を調べたところ、図 6 のようになった。横軸に回転速度、縦軸の慣性特徴量を取り、対数近似曲線を重畳表示している。回転速度が速くなるに従って慣性の値が減少していく。この関係を用いたボールの回転速度推定が可能である。

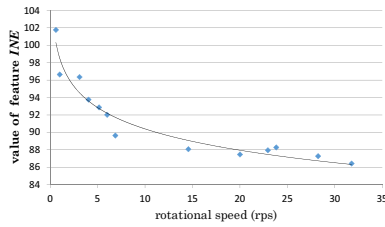


図 6: 回転速度と慣性の関係

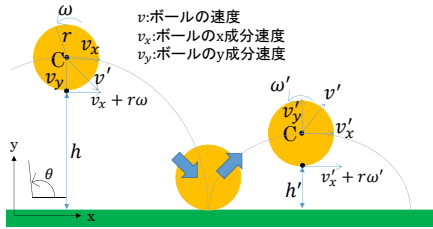


図 7: 各軸の定義

### 3 回転状態推定を用いたバウンド推定

#### 3.1 回転ボールのバウンド前後の関係

バウンドモデル構築のため、回転ボールのバウンド時の接線反発係数  $e_x$ 、法線反発係数  $e_y$ 、運動量についてまとめる。図 7 のように、ボールの蹴りだされた方向を  $x$  軸正方向、上方向を  $y$  軸正方向、 $xy$  平面上でロボットがボールをバックspinさせる回転方向を正方向とする。図 7 の文字を使い、ボールのバウンド前後の関係は式 3,4,5 のようになる。

$$e_x = \frac{v'_x + r\omega'}{v_x + r\omega} \quad (3)$$

$$e_y = -\frac{v'_y}{v_y} = \sqrt{\frac{h'}{h}} \quad (4)$$

$$mrv_x - I_c\omega = mrv'_x - I_c\omega' \quad (5)$$

$I_c = \alpha mr^2$ : 重心周りの角慣性

$\alpha = \frac{2}{5}$ : 均質な剛体球における角質量係数

#### 3.2 回転ボールのバウンド計測

回転ボールの運動計測することで  $e_x$ 、 $e_y$ 、運動量保存の確認を行った。図 8,9,10 は確認実験の結果である。 $e_x$  は図 8 のようになった。また回転ボールの運動量は図 9 からバウンドの前後でおおよそ保存していることが確認できた。 $e_y$  は、図 10 のようになった。

## 4 ロボカップ戦略への応用

#### 4.1 ロボカップ戦略高度化への一手法

SSL への応用を考えた時、最も重要なことは回転付きチップキックされたボールが最終的にどのような速度になるかである。特に重要なのは、ボールが大きく速度を変え、蹴りだされた方向とは逆になる場合、つまり  $v'_x \ll 0$  になる場合への対応である。2 章で提案したボールの回転状態推定手法を用いてボールの回転状態を推定し、3 章でまとめたボールの運動モデルを元にボールの速度予測が可能になった。この速度予測を用いることで速度変化するボールを捕球する時間を短縮することができる。

#### 4.2 ボールの回り込みの時間計測

SSL の守備で敵攻撃を防ぐためには、敵ロボットよりボールに早く触れることが重要である。そこでボールが回転付きチップキックで蹴りだされてから触れるまでの時間の測定を行った。

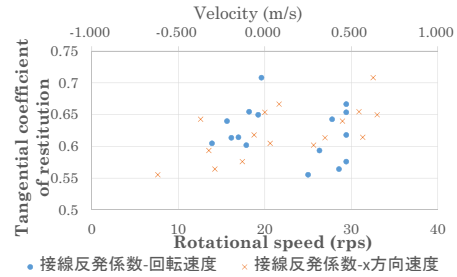


図 8: バウンド前の速度、回転速度と接線反発係数の関係

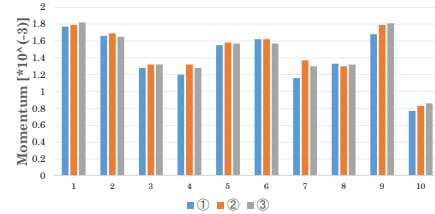
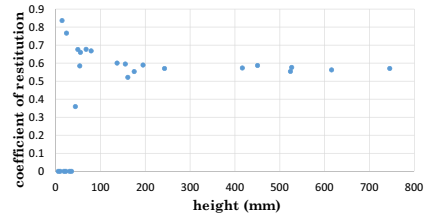
図 9: 10 回分の  $x$  軸方向の運動量の推移 ①:バウンド前、②:1 度バウンドした後、③:2 度バウンドした後の運動量

図 10: ボールの高さに対する法線反発係数

回転ボールの速度予測を入れていない従来システムをシステム 1、入れた新システムをシステム 2 とすると、ボールに触るまでの時間は表 1 のようになった。

平均時間では 33%、最大時間では 3%、最小時間では 52% の時間の短縮を行うことができた。いずれにおいても従来システムより移動時間の短縮が行えたため、ボールの回転状態推定とバウンド推定を用いてロボカップ戦略の高度化ができたと考えられる。

表 1: ボールに触れるまでの移動時間

回数	システム 1 [秒]	システム 2 [秒]
平均時間	3.081	2.076
最大時間	3.333	3.233
最短時間	2.867	1.433

## 5 おわりに

本研究では、濃度共起行列と慣性特徴量を用いたボールの回転状態推定手法の提案を行った。慣性の値を閾値処理することでボールの状態を推定し、また、慣性の値から回転速度の推定を行うなど手法の拡張を行った。さらに回転状態、バウンドモデルを用いたロボカップ小型リーグの戦略の高度化を行った。結果として従来の 52% の移動時間の短縮を実現できた。

今後の課題として運動モデルを改良しボールに触れるまでの移動時間の短縮などがあげられる。

### 参考文献

- [1] Liu, C., Hayakawa, Y., Nakasima, A., "An On-Line Algorithm for Measuring the Translational and Rotational Velocities of a Table Tennis Ball", SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Volume 5, Issue 4, pp. 233-241 (2012).